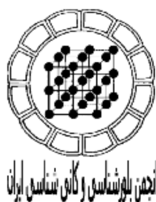
مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

مقاله پژوهشی

سال سی و یکم، شمارهٔ اول، بهار ۱۴۰۲، از صفحهٔ ۱۷ تا ۳۰



محاسبه تبادل جرمی عناصر در کانسار مس خود، غرب یزد

اعظم زاهدی[*1]، محمد بومری[2]

۱- گروه زمین شناسی، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران

۲- گروه زمین شناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۳/۲، نسخه نهایی: ۱۴۰۱/۵/۸)

چکیده: کانسار مس خود در غرب یزد از مهم‌ترین کانسارهای اسکارنی منطقه معدنی تفت بوده که در بخش میانی کمربند ماگمایی ارومیه- دختر واقع است. نفوذ استوک گرانودیوریتی خود در بخش کربناتی سازند نایبند منجر به تشکیل کانسار اسکارنی مس گردیده و پهنه‌های اسکارنی متنوعی را ایجاد کرده است. تبادل‌های جرمی منجر به تغییرات کانی‌شناسی در پهنه های مختلف اسکارنی شده است. در این پژوهش، تغییرات جرمی عناصر و تحرک عنصری در پهنه‌های اسکارنی کانسار خود نسبت به سنگ‌های کربناتی دگرسان نشده محاسبه گردیده است. نتایج نشان داد که عناصر اصلی سیلسیم، آهن و منگنز بیش‌ترین افزایش جرم را در پهنه‌های اسکارنی دارند. عناصر خاکی نادر و همچنین سایر عناصر کمیاب چون ربیدیم، اورانیم، وانادیم، نئوبیم، کروم، ایتریم، مس و روی نیز افزایش جرم نشان داده‌اند. میزان غنی شدگی عناصر خاکی نادر سبک می‌تواند به فراوانی گارنت‌ها و ترکیب آن‌ها نسبت داده شود، به طوری که مقادیر عناصر خاکی نادر سبک در گارنت‌های آلومینیم‌دار نسبت به گارنت‌های آندرادیتی بیشتر است، چگونگی و علل ایجاد این تغییرات با استفاده از روش زمین‌شیمیایی محاسبه تغییرات جرم بحث شده است.

واژه‌های کلیدی: *تغییرات جرم؛ پهنه‌های اسکارنی؛ خود؛ یزد.*

مقدمه

منطقه خود در غرب شهرستان یزد در بخشی از منطقه معدنی تفت که با کمربند ماگمایی ارومیه- دختر قطع می‌شود قرار دارد. منطقه غرب و جنوب غرب یزد دربردارنده رخنمون‌های متعددی از سنگ‌های کربناتی مزوزوئیک است که با گرانیتوئیدهای الیگومیوسن قطع شده‌اند. در منطقه خود، فعالیت ماگمایی به صورت دایک‌ها و زبانه‌های نفوذی کوچک مشخص است که در سنگ آهک‌های سازند نایبند باعث اسکارن‌زایی شده‌اند (شکل ۱). این زبانه‌های نفوذی نیمه عمیق بوده و دارای ترکیب عمده گرانودیوریت پورفیری هستند. این زبانه‌ها در گستره‌ای به مساحت حدود ۱۵ کیلومتر مربع به ۲۷۶ عدد می‌رسند [۱]. بر اساس بررسی‌های یزدی [۱] و زاهدی [۲]، کانسار مس خود در ارتباط با توده‌های نفوذی حدواسط تا اسیدی با بافت پورفیری بوده و از نوع پورفیری- اسکارن معرفی گردیده است. دگرسانی فیلیک، بیش‌ترین گسترش را در پهنه‌های دگرسان خود دارد و همراه با کانه‌زایی مس است. پژوهش‌های بسیاری پیرامون پهنه‌های دگرسان و سیال‌های مربوط به آن‌ها در کانسارهای پورفیری انجام شده اما بررسی کمی چندانی در زمینه تغییرات جرم در پهنه‌های مختلف دگرسانی صورت نگرفته است. در این پژوهش، تغییرات جرم عناصر اصلی و نادر با استفاده از روش زمین‌شیمیایی [۳] محاسبه شده است.

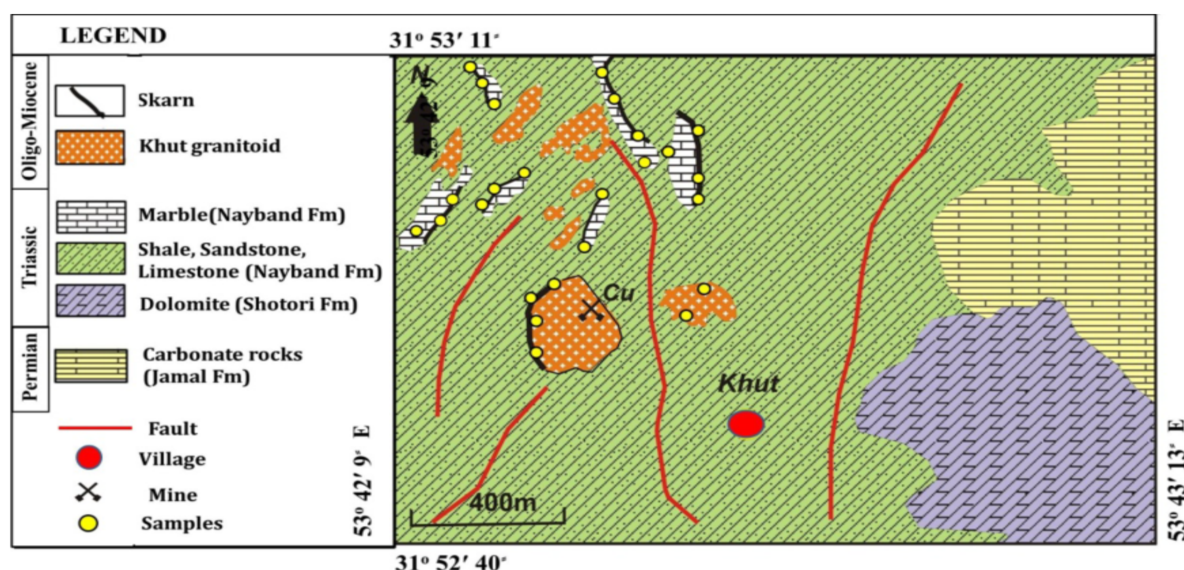
روش بررسی

بازدیدهای صحرایی و نمونه‌برداری در منطقه مورد بررسی در چند مرحله بطوری انجام شد که رابطه و تغییرات زمین-شیمیایی رخ داده در سنگ‌های نفوذی تا پهنه‌های کانی‌زایی شده و سنگ‌های رسوبی دگرسان نشده (سنگ‌های کربناتی)

*نویسنده مسئول، تلفن:۰۹۱۷۷۰۳۳۷۲۴، پست الکترونیکی: azamzahra1358@gmail.com

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.1.2.3]

[DOI: 10.52547/ijcm.31.1.17]



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی ساده شده منطقه خود در غرب یزد برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ خضرآباد با تغییرات. موقعیت نمونه‌های برداشت شده با نماد دایره در تماس با مرمرها و زبانه‌های نفوذی بر نقشه نشان داده شده است.

آشکار گردد. تجزیه شیمیایی نمونه‌های سنگی به روش طیف‌سنجی فلئورسانس پرتو X (XRF) با استفاده از قرص شیشه‌ای با دستگاه RIX 2000 در دانشگاه یاماگاتای ژاپن برای تعیین عناصر اصلی و برخی از عناصر نادر انجام شد. سپس، برای تعیین عناصر کمیاب و خاکی نادر در اسکارن‌ها، مرمرهای کانه‌دار و بدون کانه و سنگ‌های کربناتی مورد بررسی نمونه‌های سنگی در آزمایشگاه Actlabs در کانادا به روش طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی تولید شده توسط گاز آرگون (Ar-ICP/MS) تجزیه شدند. بر اساس بررسی‌های سنگ‌نگاری و کانی‌نگاری، سه پهنه اسکارنی گارنت-پیروکسن اسکارن، گارنت اسکارن و مرمر کانه‌دار برای پهنه‌های اسکارنی خود در نظر گرفته شد (جدول ۱). مقادیر میانگین عناصر اصلی و نادر در این پهنه‌های اسکارنی تعیین و تغییرات جرمی عناصر در آن‌ها با استفاده از روش مرجع [۳] محاسبه گردید (جدول ۲، جدول ۳ و ۴).

بحث و بررسی

مراحل اسکارن‌زایی

زایش و تکوین ترکیبی کانی‌های اسکارنی خود در سه مرحله اصلی رخ داده است [۴]: (۱) مرحله پیش‌رونده پیشین که با هدنبرژیت‌های غنی از منیزیم ($Hd_{53.7}Di_{42.3}$-$Hd_{86.1}Di_{9.5}$) همراه با آندرادیت‌های آلومینیم‌دار (با X_{and} % بین 69.8- 99.5 مشخص می‌گردد، (۲) مرحله پیش‌رونده پسین که با آندرادیت‌های تقریباً خالص (با X_{and} % بین 98.4 -96.2) مشخص می‌شود و نهشت اولیه پیروتیت در این مرحله آغاز شده است و (۳) مرحله پس‌رونده در برون‌اسکارن شامل مجموعه‌ای از فرواکتینولیت، کوارتز، کلسیت، اپیدوت، کلریت، اسفالریت، پیریت و کالکوپیریت که به طور بخشی جانشین مجموعه کانی‌های اولیه در شرایط ایستابی در طول شکستگی-های اسکارن پیشین می‌شود.

جدول ۱ کانی‌شناسی پهنه‌های مختلف اسکارنی و سنگ کربناتی میزبان در کانسار خود.

نام پهنه	مجموعه کانی‌ها
آهک مارنی	کلسیت و کانی‌های رسی
مرمر	کلسیت
مرمر کانه‌دار	کلسیت، کالکوپیریت، پیریت، اسفالریت، پیروتیت
گارنت اسکارن	آندرادیت، کلسیت، کوارتز، کالکوپیریت، پیریت، اپیدوت، فرواکتینولیت، کلریت
گارنت- پیروکسن اسکارن	آندرادیت- گروسولاریت، کلسیت، کوارتز، هدنبرژیت غنی از منیزیم، اپیدوت، فرواکتینولیت

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.1.2.3]
[DOI: 10.52547/ijcm.31.1.17]

جدول ۲ مقادیر میانگین عناصر اصلی و نادر در پهنه‌های مختلف اسکارنی خود. (برحسب درصد وزنی).

Zone name	Marly limestone	Cu bearing marble	Garnet Skarn	Garnet-Pyroxene Skarn
SiO_2	۱۱/۴۲	۲۶/۸۷	۲۵/۶۴	۳۱/۶۱
TiO_2	۰/۱۲	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۱۶
Al_2O_3	۲/۳۳	۱/۱۹	۱/۷۳	۴/۷۵
FeOt	۳/۶۲	۲۱/۵۲	۲۲/۱۹	۱۴/۰۰
MnO	۰/۳۰	۰/۲۳	۰/۲۲	۰/۳۳
MgO	۱/۸۳	۱/۵۷	۰/۹۱	۱/۲۸
CaO	۵۰/۰۰	۲۰/۲۰	۴۲/۹۹	۳۴/۰۸
Na_2O	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۱۱
K_2O	۰/۱۵	۰/۰۹	۰/۲۱	۱/۰۹
P_2O_5	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۵
LOI	۳۰/۰۰	۲۸/۱۵	۵/۹۲	۱۲/۳
Total	۹۹/۸۹	۹۹/۹۸	۹۹/۹۸	۹۹/۷۶
Ba	۳۷/۴۰	۴/۷۰	۱۰/۶۰	۳۱/۸۷
V	۲۵/۴۰	۱۱/۵۰	۱۸/۷۳	۴۲/۹۳
Cl	۳۰/۹۷	۳۸/۱۶	۲۰۶/۴۳	۹۴۳/۹۷
Y	۴/۶۷	۲/۹۵	۳/۵۳	۵/۷۵
Co	۰/۵۰	۱۹۶۲/۱۴	۱۴/۷۰	۴۹/۸۸
Zn	۲۲/۸۷	۹۹۱/۵۵	۲۹/۰۷	۱۴۴/۹۱
Cr	۸/۴۳	۱۶/۹۱	۸/۰۰	۱۹/۰۹
Zr	۷۳/۸۷	۱۰۹/۱۴	۷/۵۷	۲۴/۰۴
Cu	۷/۵۳	۳۵۵۹/۷۳	۳۵۵/۰۳	۱۸۵۴/۵۳۳
Ga	۰/۷۳	۰/۹۸	۳/۰۰	۳/۴۷
Nb	۱/۰۰	۴/۹۵	۱/۲۰	۲/۸۹
Ni	۰/۱۰	۱/۱۵	۰/۰۰	۳/۳۰
Rb	۴/۷۷	۱۶۳/۲۳	۱۰/۵۷	۸۸/۴۸
Sr	۵۶۱/۸۳	۴۰۹/۵۹	۳۳/۰۳	۳۵۷/۰۷

جدول ۳ تغییرات جرمی محاسبه شده برای عناصر اصلی و نادر در انواع پهنه‌های اسکارنی خود.

Zone name	**R.C (**Reconstructed Composition)			**M.C (**Mass Change)		
	Cu bearing marble	Garnet Skarn	Garnet-Pyroxene Skarn	Cu bearing marble	Garnet Skarn	Garnet-Pyroxene Skarn
SiO_2	۵۷/۴۷	۴۱/۵۸	۲۵/۰۱	۴۶/۰۵	۳۰/۱۶	۱۳/۵۹
TiO_2	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
Al_2O_3	۲/۵۵	۲/۸۰	۳/۷۶	۰/۲۲	۰/۴۷	۱/۴۳
FeOt	۴۶/۰۳	۳۵/۹۸	۱۱/۰۷	۴۲/۴۰	۳۲/۳۶	۷/۴۵
MnO	۰/۵۰	۰/۳۶	۰/۲۶	۰/۲۰	۰/۰۶	-۰/۰۳
MgO	۳/۳۶	۱/۴۸	۱/.۱	۱/۵۳	-۰/۳۵	-۰/۸۲
CaO	۴۳/۲۱	۶۹/۷۱	۲۶/۹۶	-۶/۷۹	۱۹/۷۱	-۲۳/۰۴
Na_2O	۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۱
K_2O	۰/۲۰	۰/۳۴	۰/۸۷	۰/۰۵	۰/۱۹	۰/۷۲
P_2O_5	۰/۰۹	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۴	-۰/۰۳	۰/۰۱
Ba	۱۰/۰۵	۱۷/۱۹	۲۵/۲۱	-۲۷/۳۵	-۲۰/۲۱	-۱۲/۱۹
V	۲۴/۶۰	۳۰/۳۸	۳۳/۹۷	-۰/۸۰	۴/۹۸	۸/۵۷
Cl	۸۱/۶۳	۳۳۴/۷۸	۷۴۶/۸۸	۵۰/۶۷	۳۰۳/۸۱	۷۱۵/۹۱
Y	۶/۳۱	۵/۷۳	۴/۵۵	۱/۶۴	۱/۰۶	-۰/۱۲
Co	۴۱۹۷/۱۵	۲۳/۸۴	۳۹/۴۷	۴۱۹۶/۶۵	۲۳/۳۴	۳۸/۹۷
Zn	۲۱۲۰/۹۹	۴۷/۱۴	۱۱۴/۶۶	۲۰۹۸/۱۳	۲۴/۲۷	۹۱/۷۹
Cr	۳۶/۱۸	۱۲/۹۷	۱۵/۱۰	۲۷/۷۴	۴/۵۴	۶/۶۷
Zr	۲۳۳/۴۵	۱۲/۲۷	۱۹/۰۲	۱۵۹/۵۹	-۶۱/۶۰	-۵۴/۸۴
Cu	۷۶۱۴/۵۱	۵۷۵/۷۷	۱۴۶۷/۳۳	۷۶۰۶/۹۸	۵۶۸/۲۴	۱۴۵۹/۸۰
Ga	۲/۰۹	۴/۸۷	۲/۷۴	۱/۳۵	۴/۱۳	۲/۰۱
Nb	۱۰/۵۹	۱/۹۵	۲/۲۸	۹/۵۹	۰/۹۵	۱/۲۸
Ni	۲/۴۶	۰/۰۰۰	۲/۶۱	۲/۳۶	-۰/۱	۲/۵۱
Rb	۳۴۹/۱۵	۱۷/۱۴	۷۰/۰۱	۳۴۴/۳۸	۱۲/۳۷	۶۵/۲۴
Sr	۸۷۶/۱۳	۵۳/۵۷	۲۹۶/۷۶	۳۱۴/۳۰	۵۰۸/۲۶	-۲۶۵/۰۷

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.1.2.3]

[DOI: 10.52547/ijcm.31.1.17]

جدول ۴ تغییرات جرمی محاسبه شده برای عناصر نادر و خاکی نادر در پهنه‌های اسکارنی خود.

Zone name	R.C			M.C		
	Cu bearing marble	Garnet skarn	Garnet- pyroxene skarn	Cu bearing marble	Garnet skarn	Garnet-pyroxene skarn
La	۵٫۳۵	۱۹٫۳۸	۱۰٫۹۲	-۱٫۱۵	۱۲٫۸۸	۴٫۴۲
Ce	۱۰٫۳۳	۳۵٫۱۱	۱۸٫۸۷	-۴٫۲۷	۲۰٫۵۱	۴٫۲۷
Pr	۱٫۲۸	۳٫۳۲	۱٫۸۵	-۰٫۵۲	۱٫۵۲	۰٫۰۵
Nd	۵٫۱۸	۱۱٫۳۰	۷٫۷۸	-۱٫۸۰	۴٫۳۲	۰٫۸۰
Sm	۱٫۳۹	۲٫۱۹	۱٫۷۷	-۰٫۳۱	۰٫۴۹	۰٫۰۷
Eu	۰٫۴۳	۱٫۱۴	۰٫۵۳	-۰٫۰۷	۰٫۶۴	۰٫۰۳
Gd	۱٫۸۲	۲٫۳۵	۱٫۷۹	۰٫۰۲	۰٫۵۵	-۰٫۰۱
Tb	۰٫۴۳	۰٫۳۲	۰٫۲۱	۰٫۲۳	۰٫۱۲	۰٫۰۱
Dy	۱٫۶۰	۱٫۵۴	۱٫۱۹	۰٫۴۰	۰٫۳۴	-۰٫۰۱
Ho	۰٫۴۳	۰٫۳۲	۰٫۲۱	۰٫۲۳	۰٫۱۲	۰٫۰۱
Er	۰٫۸۶	۰٫۸۱	۰٫۶۳	۰٫۲۶	۰٫۲۱	۰٫۰۳
Yb	۰٫۷۵	۰٫۷۳	۰٫۵۳	۰٫۳۵	۰٫۳۳	۰٫۱۳
W	۴٫۰۶	۸۵٫۶۳	۸٫۹۱	۳٫۶۶	۸۵٫۲۳	۸٫۵۱
Pb	۳۴٫۹۷	۳٫۳۸	۴٫۹۲	-۲٫۱۳	-۳۳٫۷۲	-۳۲٫۱۸
Th	۱٫۹۳	۱٫۴۶	۳٫۱۱	۰٫۰۳	-۰٫۴۴	۱٫۲۱
U	۲٫۷۸	۵٫۴۳	۱٫۸۲	۱٫۶۸	۴٫۳۳	۰٫۷۲
Sc	۲٫۷۸	۰٫۶۵	۱٫۱۶	۱٫۰۸	-۱٫۰۵	-۰٫۵۴
As	۳۱۳٫۹۱	۶۶٫۲۵	۲۲۲٫۱۵	۳۰۷٫۶۱	۵۹٫۹۵	۲۱۵٫۸۵
Mo	۰٫۸۶	۳۱٫۰۶	۴۹٫۱۱	۰٫۶۷	۳۰٫۸۷	۴۸٫۹۲
Ag	۲۱٫۹۳	۰٫۶۸	۱۲٫۵۴	۲۱٫۵۸	۰٫۳۴	۱۲٫۲۰
Cd	۳٫۶۷	۰٫۴۰	۰٫۸۴	۳٫۴۵	۰٫۱۸	۰٫۶۲
Sn	۷٫۲۹	۱۳٫۹۸	۵٫۹۳	۷٫۲۱	۱۳٫۹۰	۵٫۸۵
Sb	۱۰۰٫۰۳	۰٫۳۱	۱٫۶۴	۹۷٫۱۷	-۲٫۵۵	-۱٫۲۲
Cs	۰٫۶۶	۰٫۱۰	۰٫۵۷	۰٫۲۴	-۰٫۳۲	۰٫۱۵

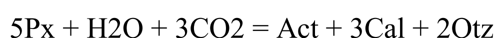
کانی‌شناسی و کانه‌نگاری

رخدادهای اسکارنی در کانسار خود به صورت عدسی‌ها و یا بخش‌های جانبی در مرمرها و جانشینی‌های توده‌ای در تماس بین مرمرها و زبانه‌های نفوذی رخ داده است. اسکارن تشکیل شده در کانسار خود از نوع برون‌اسکارن است که در آن پهنه های گارنت-پیروکسن اسکارن و گارنت اسکارن دو پهنه عمده را تشکیل داده‌اند.

- پهنه گارنت پیروکسن اسکارن

این پهنه بیشتر از گارنت تشکیل شده است که با کمی کلینوپیروکسن همراهی می‌شود. گارنت از شاخص‌ترین و فراوان‌ترین کانی‌های سازنده پهنه‌های اسکارنی خود است که نسبت به کلینوپیروکسن‌ها، فراوانی بیشتری دارد و می‌تواند به حالت اکسایش توده نفوذی و سنگ میزبان مربوط باشد [۵]. این گارنت‌ها متوسط تا درشت‌بلور بوده و دارای شکل‌های خوش‌وجه هستند و بیش از ۵۰ درصد حجمی سنگ اسکارنی را تشکیل داده‌اند (شکل ۲ الف). گارنت‌ها در این پهنه ناهمسانگرد بوده و دارای منطقه‌بندی نوسانی و ماکل قطاعی هستند (شکل ۲ ب). تشکیل گارنت و دیگر کانی‌های اسکارنی بی‌آب مانند پیروکسن‌ها به اسکارن پیش‌رونده معروف است و تبدیل آن‌ها به کانی‌های آبداری چون فرواکتینولیت، کلریت و اپیدوت به اسکارن پس‌رونده نسبت داده می‌شود.

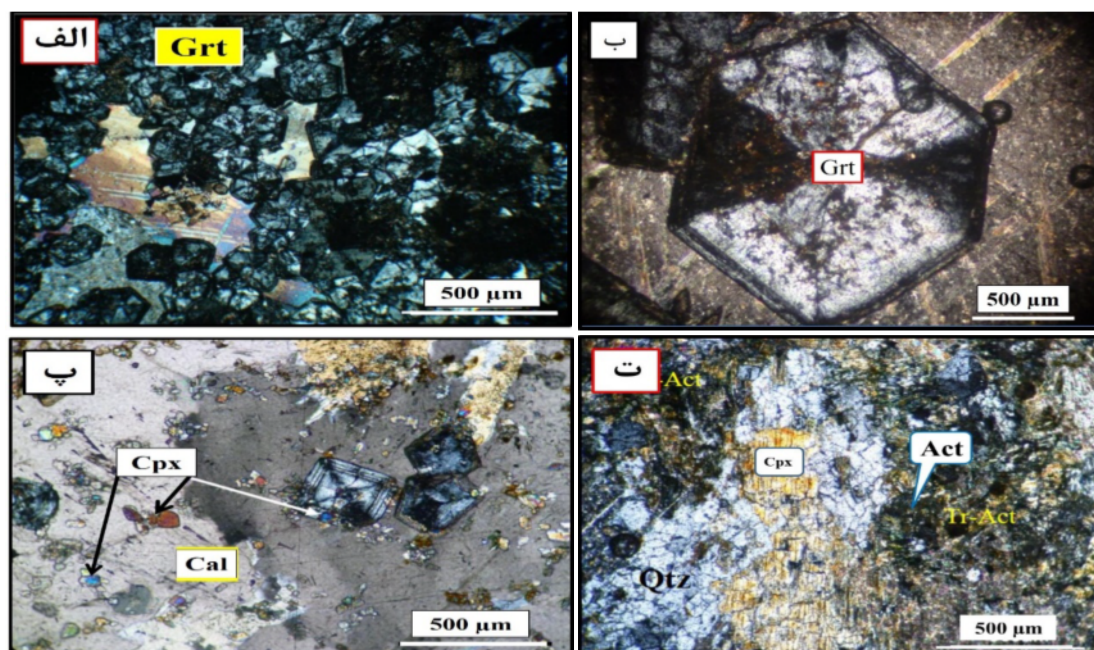
کلینوپیروکسن‌ها در مقایسه با گارنت‌ها به صورت کانی فرعی در مرمرهای در تماس نزدیک با شیل‌های دارای مواد آلی یافت می‌شوند. کلینوپیروکسن بیشتر به صورت بلورهای ریز بی‌شکل تا نیمه شکل‌دار به شکل میانبار در گارنت دیده شده که نشان‌دهنده رشد همزمان این دو کانی یا تبلور زودتر کلینوپیروکسن است (شکل ۲ پ). این کلینوپیروکسن‌ها در مرحله دگرسانی بعدی طی واکنش زیر به فرواکتینولیت، کلسیت و کوارتز تبدیل شده‌اند (شکل ۲ ت):



5Px + H2O + 3CO2 = Act + 3Cal + 2Qtz

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.1.2.3]

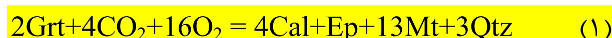
[DOI: 10.52547/ijcm.31.1.17]



شکل ۲ تصاویر میکروسکوپی از پهنه گارنت-پیروکسن اسکارن در کانسار خود: الف) گارنت‌های درشت‌بلور که بیش از ۵۰ درصد سنگ اسکارنی را تشکیل داده است، ب) منطقه‌بندی نوسانی و ماکل قطاعی در گارنت‌های ناهمسانگرد، پ) کلینوپیروکسن به صورت میانبار در گارنت‌ها و ت) جانشینی کلینوپیروکسن با فرواکتینولیت. همه تصاویر در نور قطبیده متقاطع (XPL) تهیه شده‌اند.

- پهنه گارنت اسکارن

مقدار گارنت در این پهنه به بیش از ۷۰ درصد می‌رسد (شکل-های ۳ الف و ب). پهنه گارنت اسکارن در منطقه خود به سه شکل متفاوت وجود دارد؛ نسل اول (نوع I) گارنت اسکارن‌هایی با بافت دانه‌ای هستند و همه از گارنت‌های ناهمسانگرد خودشکل تشکیل شده‌اند (شکل ۳ الف). این نسل از گارنت‌ها منطقه‌بندی نوسانی و ماکل قطاعی را آشکارا نشان می‌دهند. نسل دوم (نوع II) گارنت اسکارن‌هایی تشکیل شده از گارنت-های همسانگرد خودشکل با بافت دانه‌ای بوده (شکل‌های ۳ پ و ت) و بدون منطقه‌بندی نوسانی و ماکل قطاعی هستند و تنها ناهمسانگردی ضعیفی را در لبه نشان می‌دهند (شکل ۳ ت). دگرسانی آن‌ها به اپیدوت، کلریت و کلسیت در بخش مرکزی نمایان است (شکل ۳ ث، واکنش ۱). نسل سوم (نوع III) گارنت اسکارن‌هایی شامل گارنت‌های همسانگرد بی‌شکل هستند و هیچ تغییر ترکیبی نشان نمی‌دهند (شکل ۳ج).



$$2Grt+4CO_2+16O_2 = 4Cal+Ep+13Mt+3Qtz \quad (۱)$$

کانه‌نگاری

روابط همبری بین کانی‌ها و کانه‌ها در کانسار خود نشان می‌دهد که کانه‌زایی درون‌زاد در مرحله پیش‌رونده پسین بعد از شکل‌گیری اسکارن آغاز شده و کانه‌زایی درون‌زاد به صورت جانشینی، شکافه پرکن و افشان در مرمرها و اسکارن‌ها رخ داده است (شکل ۴ الف). پیریت و کالکوپیریت فراوان‌ترین کانی سولفیدی در کانسار خود هستند که به صورت انتشاری، شکافه پرکن و جانشینی در مرمرها و اسکارن‌ها دیده می‌شوند (شکل-های ۴ب و پ). این کانه‌ها همراه با کمی پیروتیت و اسفالریت یافت می‌شوند (شکل ۴ ت).

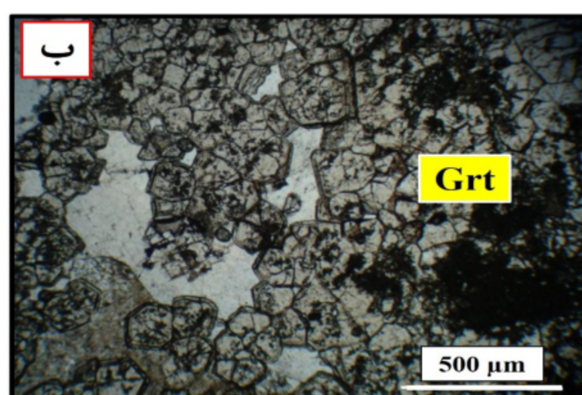
بررسی تبادل های جرمی عناصر در پهنه های اسکارنی

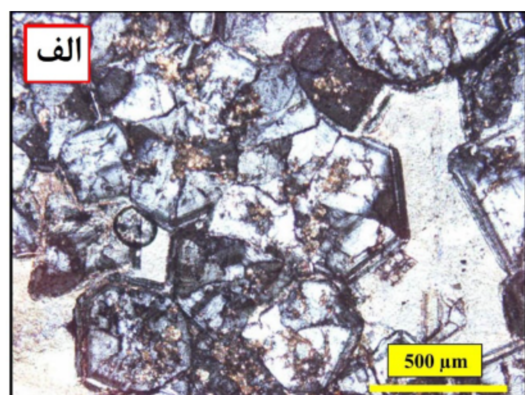
تاکنون روش‌های مختلفی برای محاسبه تغییرات جرم عناصر در کانسارها، سامانه‌های دگرسان شده، محیط های دگرگونی و محیط‌های هوازده ارائه شده‌اند که برای مثال می‌توان به روش ضریب حجم [۶] روش هم غلظت [۷] و روش عنصر نامتحرک [۳، ۸، ۹] اشاره کرد. تغییرات جرمی عناصر در پهنه‌های دگرسان خود از روش زمین‌شیمیایی محاسبه تغییرات [۳] محاسبه شدند تا بتوان به چگونگی و چرایی ایجاد این تغییرات جرمی پی‌برد. این روش بر اساس عنصر شاخص نامتحرک، ضریب غنی‌شدگی و ترکیب بازسازی شده استوار است. برای این منظور، سنگ کربناتی دگرسان نشده سازند نایبند که براساس نتایج XRF یک سنگ آهک مارنی است [۲]، به عنوان

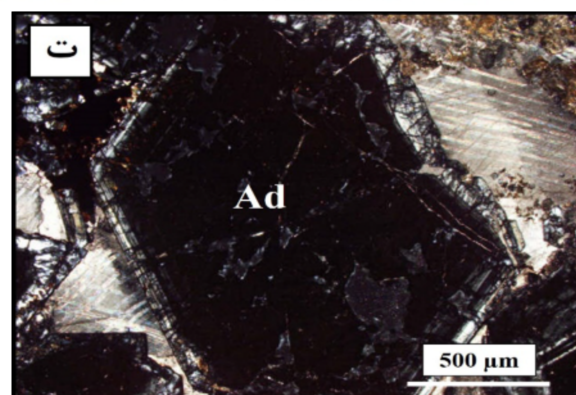
[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.1.2.3]
[DOI: 10.52547/ijcm.31.1.17]

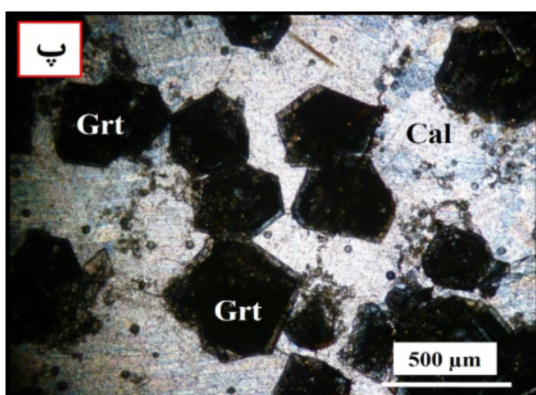
سنگ مبنای مقایسه برای پهنه‌های اسکارنی خود در نظر گرفته شده و عنصر تیتانیم به عنوان عنصر ناظر نامتحرک انتخاب شده است. سپس، ضریب غنی‌شدگی (E.F)، ترکیب بازسازی شده (R.C) و سرانجام تغییر جرم عناصر (MC) به ترتیب از روابط (۳) تا (۵) محاسبه شد.

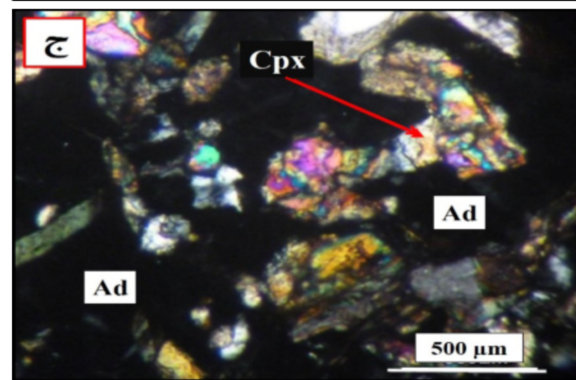
در بررسی تغییرات جرم در طی دگرسانی این نکته قابل توجه است که هرگاه مقدار عناصر نامتحـرک در نمونه‌های کمتر دگرسان شد در اثر خروج عناصر متحرک به طور نسبی غنی شوند، جرم شبکه کاهش می‌یابد و هنگامی که مقدار عناصر متحرک در سنگ افزایش یابد، عناصر نامتحرک در سنگ رقیق شده یا به بیان دیگر مقدار آنها کاهش می‌یابد که در این حالت شبکه افزایش جرم داشته است. بنابراین هدف از محاسبه تغییر جرم طی دگرسانی تعیین افزایش یا کاهش جرم شبکه است که براساس بزرگی تغییرات عناصر متحرک تعیین می‌شود [۷].

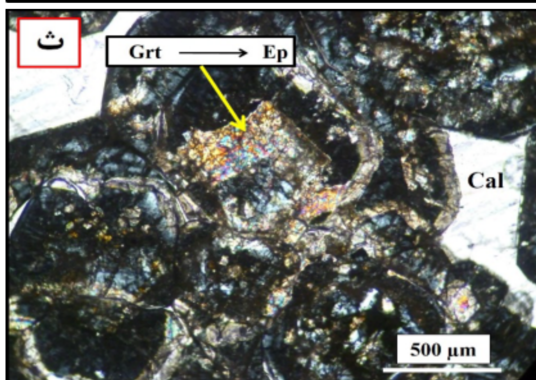






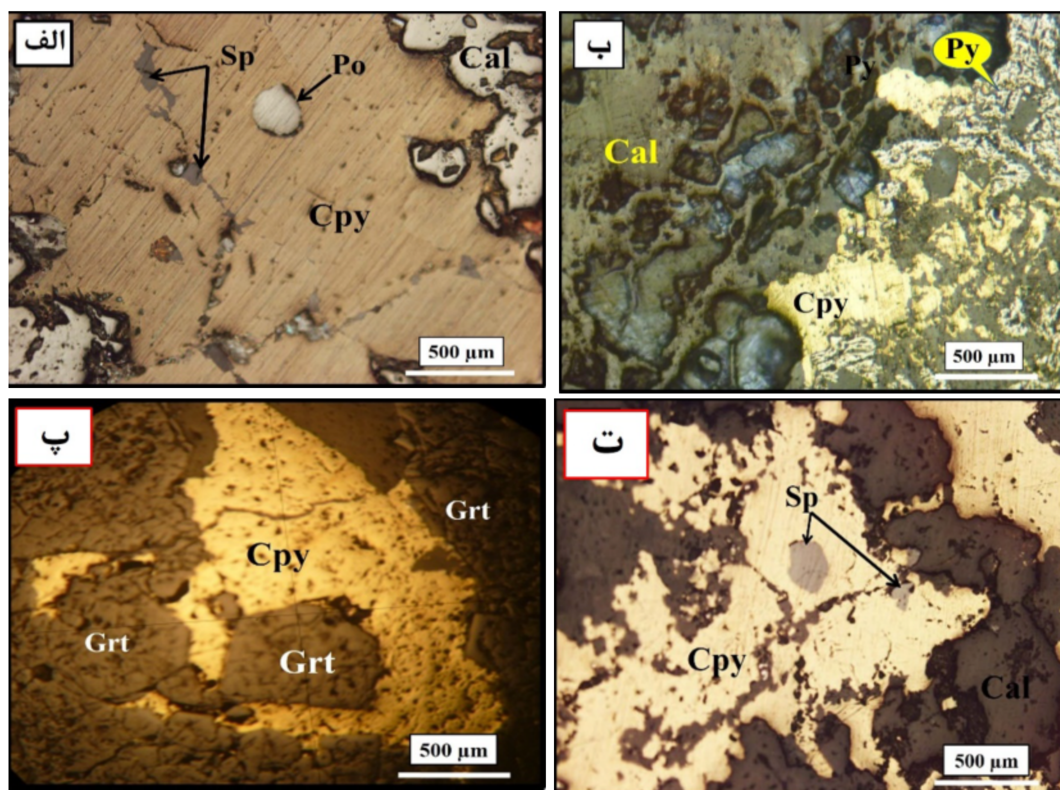






شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی از پهنه گارنت اسکارن در کانسار خود در نور قطبیده ساده و متقاطع: الف و ب) بافت دانه‌ای و ماکل قطاعی در گارنت‌های ناهمسانگرد خودشکل (نوع I) به ترتیب در نور قطبیده متقاطع و ساده، پ) گارنت‌های همسانگرد خودشکل با بافت دانه‌ای (نوع II)، ت) ناهمسانگردی ضعیف در لبه گارنت‌های همسانگرد خودشکل (نوع II)، ث) جانشینی گارنت با اپیدوت و کلریت در مرکز گارنت‌ها (نوع II) و ج) گارنت‌های همسانگرد بی‌شکل و بدون منطقه بندی (نوع III).

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.1.2.3]
[DOI: 10.52547/ijcm.31.1.17]



شکل ۴ تصاویر میکروسکوپی از کانه‌نگاری در اسکارن‌ها و مرمرهای سولفیدی خود در نور بازتابی: الف- کانه‌زایی پیروتیت و اسفالریت به ترتیب به صورت میانبار و رگچه‌ای (شکافه پرکن) در مرمرهای سولفیدی، ب) رخداد پیریت و کالکوپیریت به صورت جانشینی در مرمرهای سولفیدی، پ) رخداد کالکوپیریت به صورت پرکننده فضای خالی بین بلورهای گارنت در گارنت اسکارن و ت) کانه‌زایی اسفالریت به صورت میانبار در مرمرهای سولفیدی.

تعیین عنصر شاخص نامتحرک

برای محاسبه تغییرات جرم عناصر، باید عنصری با ویژگی‌هایی چون دارا بودن بیش‌ترین ثبات شیمیایی طی فرایندهای هوازدگی و نداشتن میل ترکیبی شیمیایی، بالا بودن غلظت عنصر به طوری که با روش‌های معمول قابل تجزیه باشد، انحلال‌پذیری کم و بسته بودن سامانه برای آن را انتخاب و تغییرات دیگر را نسبت به آن محاسبه کرد [۳]. با در نظر گرفتن ویژگی‌های بیان شده، سنگ‌های کربناتی سازند نایبند با کمترین دگرسانی در منطقه خود به عنوان سنگ مرجع مقایسه در نظر گرفته شدند و فراوانی عنصر تیتانیم در آن به عنوان مبنای محاسباتی شاخص بی‌تحرک در پهنه‌های اسکارنی طی فرایند اسکارن‌زایی انتخاب گردید.

تعیین ضریب غنی‌شدگی

ضریب غنی‌شدگی بر اساس مقدار اکسید تیتانیم در سنگ کربناتی میزبان و پهنه‌های اسکارنی با استفاده از رابطه زیر برای هر یک از پهنه‌های دگرسان محاسبه گردید [۳].

(۳) **E.F** = فراوانی‌تیتانیم در نمونه‌اسکارنی/ فراوانی تیتانیم در سنگ‌کربناتی

نمونه‌های اسکارنی شامل نمونه‌های موجود در چهار پهنه مرمر، اسکارن منیزیمی، گارنت اسکارن و گارنت-پیروکسن اسکارن هستند.

تعیین ترکیب بازسازی شده

ترکیب بازسازی شده، جرم خالص یک واحد یا سنگ که از اجزاء متحرک غنی یا تهی شده‌اند را نشان می‌دهد. ترکیب بازسازی شده برای هر عنصر از رابطه زیر محاسبه شد:

(۴) **R.C**=E.F× فراوانی عنصر یا اکسید مورد نظر در نمونه اسکارنی

تعیین تغییر جرم عناصر

تغییرات جرم عناصر از تفاوت بین ترکیب بازسازی شده و سنگ کربناتی اولیه به دست می‌آید. مقادیر تغییرات جرم عناصر از رابطه زیر محاسبه شد:

(۵) **MC**=R.C- فراوانی عنصر در سنگ کربناتی

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.1.2.3]
[DOI: 10.52547/ijcm.31.1.17]

رفتار زمین‌شیمیایی عناصر اصلی در تبادل های جرمی

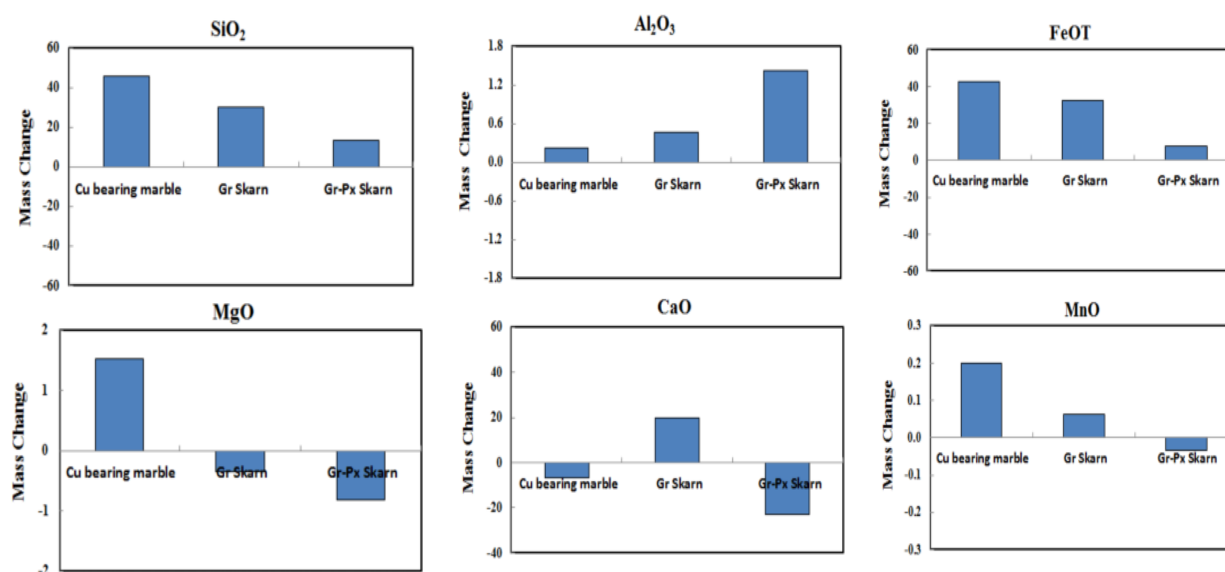
غنی‌شدگی عناصر سیلسیم، آلومینیم و آهن در همه پهنه های اسکارنی خود دیده شده است. عناصر کلسیم و منیزیم در پهنه گارنت-پیروکسن اسکارن تهی‌شدگی نشان می‌دهند. در پهنه مرمر کانه‌دار، عنصر منیزیم غنی‌شدگی و عنصر کلسیم تهی-شدگی نشان داده است (شکل ۵). غنی‌شدگی قابل توجه SiO_2 در برخی پهنه های اسکارنی را می‌توان به انتقال آن توسط سیال های گرمابی به درون سامانه اسکارنی و غنی‌شدگی کم آن را می‌توان به انحلال و شستشوی آن به بیرون از سامانه نسبت داد که اغلب طی فرایندهای پس‌رونده رخ داده است.

آلومینیم در همه پهنه های اسکارنی خود نسبت به سنگ میزبان آهکی غنی‌شدگی نشان داده است (شکل ۵). اگرچه مقداری آلومینیم در سنگ آهک مارنی میزبان در منطقه خود وجود دارد (۲/۳ درصد وزنی)، اما غنی‌شدگی این عنصر در پهنه های اسکارنی خود نشان می‌دهد که افزون بر سنگ آهک مارنی، سیال نیز می‌تواند در تامین آلومینیم مورد نیاز در پهنه های اسکارنی خود نقش موثری داشته باشد. غنی‌شدگی بیشتر این جزء در پهنه های اسکارنی خود به ترکیب گارنت‌ها بستگی دارد، به طوری که گارنت‌های کلسیمی منطقه خود آندرادیت-های آلومینیم‌دار هستند.

آهن نیز مانند سیلیسیم در پهنه های اسکارنی خود غنی-شدگی نشان داده است (شکل ۵). در کانسار خود، با افزایش فاصله از توده نفوذی غنی‌شدگی آهن افزایش می‌یابد به طوری که پهنه مرمر کانه‌دار بیش‌ترین مقادیر آهن را دارد که به حضور گسترده پیریت و کالکوپیریت در این پهنه نسبت داده می‌شود. غنی‌شدگی بیشتر آهن در پهنه گارنت اسکارن نسبت به پهنه گارنت-پیروکسن اسکارن در منطقه خود بیانگر افزایش چشمگیر گارنت‌های آندرادیتی در پهنه گارنت اسکارن است. آهن افزون بر ساختار گارنت‌ها، در ساختار پیروکسن‌های اسکارنی با ترکیب هدنبرژیت غنی از منیزیم نیز جای دارد، اما با توجه به فراوانی کم پیروکسن‌ها به نظر می‌رسد که مقادیر عمده آهن در ترکیب گارنت‌های کلسیمی باشد. با توجه به فراوانی کم آهن در سنگ کربناتی خود چنین نتیجه‌گیری می-شود که آهن از سیال ماگمایی وارد ترکیب سنگ میزبان شده است.

منیزیم در پهنه مرمر کانه‌دار نسبت به سنگ آهک مارنی میزبان غنی‌شدگی نشان داده است، در حالی که در سایر پهنه ها تهی‌شدگی آن دیده می‌شود (شکل ۵). غنی‌شدگی این عنصر درمرمر سولفیدی نشان دهنده تامین آن از سیال ماگمایی است. تهی‌شدگی عنصر منیزیم در دو پهنه گارنت اسکارن و گارنت-پیروکسن اسکارن نشان‌دهنده تامین آن از سنگ میزبان آهک مارنی است. منیزیم در این دو پهنه در ساختار هدنبرژیت‌های غنی از منیزیم جای دارد.

کلسیم در پهنه گارنت- پیروکسن اسکارن و مرمر کانه‌دار نسبت به سنگ آهکی میزبان تهی‌شدگی نشان می‌دهد، در حالی که در پهنه گارنت اسکارن غنی‌شدگی دارد (شکل ۵).



شکل ۵ تغییرات جرمی عناصر اصلی در پهنه‌های مختلف اسکارنی خود نسبت به سنگ کربناتی دگرسان نشده.

سنگ آهک مارنی در منطقه خود با دارا بودن کلسیم فراوان (۵۰ درصد وزنی) قادر به تامین کلسیم مورد نیاز در ساختار پهنه‌های گارنت- پیروکسن اسکارن و مرمر کانه‌دار بوده و نیازی به تامین این عنصر از سیال ماگمایی نبوده است، در حالی که این جزء در پهنه گارنت اسکارن از سیال ماگمایی تامین شده است. از آنجا که گارنت‌های آندرادیتی بخش عمده کانی‌های اسکارنی را تشکیل می‌دهند، مقادیر بیشتر کلسیم در ساختار آندرادیت‌ها و مقدار کمی در ساختار کلینوپیروکسن‌ها، فرواکتینولیت‌ها، اپیدوت و سایر کانی‌های کلسیم‌دار جای دارد.

منگنز در پهنه‌های گارنت اسکارن و مرمرهای سولفیدی نسبت به سنگ آهک میزبان غنی‌شدگی نشان می‌دهد، در حالی که در پهنه گارنت-پیروکسن اسکارن تهی‌شدگی آن دیده می‌شود (شکل ۵). غنی‌شدگی این جزء در پهنه‌های اسکارنی خود به دلیل فراوانی فرواکتینولیت در پهنه گارنت اسکارن، فراوانی پیریت و کالکوپیریت در پهنه مرمر کانه‌دار و جانشینی آهن با منگنز در این پهنه هاست.

رفتار زمین‌شیمیایی عناصر نادر در تبادل‌های جرمی

بررسی عناصر نادر، بخش اساسی از سنگ‌شناسی نوین است. زمین‌شیمی عناصر نادر، مهم‌ترین ابزار برای بررسی‌های زمین-شیمیدانان، زمین‌شناسان و زمین‌شناسان اکتشافی است [۳]. عناصر نادر ردیاب‌های مهمی برای فرایندهای دگرنهادی هستند و جزئیات بیشتری را نسبت به عناصر اصلی ثبت می‌کنند [۱۰]. سنگ‌های دگرنهادی و یا دگرسان شده مناسب-ترین سنگ‌ها برای بررسی متحرک و یا نامتحرک بودن عناصر نادر هستند. شرایطی که در آن عناصر، متحرک و یا نامتحرک هستند بسیار متنوع هستند. در برخی شرایط، عناصری که به عنوان عناصر نامتحرک نامگذاری شده‌اند، متحرک هستند [۱۱].

باریم با داشتن مقدار ۴۲۵ ppm فراوان‌ترین عنصر نادر در پوسته است [۱۲]. در سنگ‌های رسوبی، بالاترین مقدار باریم در ترکیب شیل‌ها قرار دارد (۵۸۰ppm). مناسب‌ترین کانی‌ها برای قرارگیری باریم در شبکه‌های بلوری آنها، کانی‌های پتاسیم‌دار هستند، زیرا باریم با توجه به شعاع یونی نزدیک به پتاسیم جایگزین این عنصر به صورت اسیر شده می‌گردد. از آنجا که یکی از سازنده‌های سنگ‌های مارنی، ترکیب‌های پتاسیم‌دار هستند، انتظار می‌رود که این عنصر در بخش مارنی سنگ میزبان خود قرار داشته باشد. باریم نیز می‌تواند به صورت عنصری پذیرفته شده و در بخش آهکی سنگ میزبان جانشین کلسیم گردد. همبستگی اکسید این عنصر با اکسیدهای اصلی نشان می‌دهد که این عنصر مانند کلسیم نسبت به سنگ میزبان آهکی تهی‌شدگی دارد و از این رو باریم در پهنه‌های اسکارنی مانند کلسیم از بخش آهکی سنگ میزبان تامین گردیده است. این عنصر نیز می‌تواند همراه با پتاسیم و کلسیم در ساختار گارنت‌های آلومینیم‌دار جای گیرد.

استرانسیم در پهنه گارنت اسکارن و گارنت-پیروکسن اسکارن تهی‌شدگی نشان داده در حالی که در مرمر سولفیدی غنی‌شدگی آن دیده می‌شود (شکل ۶). تهی‌شدگی این جزء در پهنه‌های گارنت اسکارن و گارنت- پیروکسن اسکارن به داشتن مقادیر بالای کلسیم (۵۰ درصد وزنی) در سنگ میزبان آهکی نسبت داده می‌شود. مقادیر استرانسیم در گرانیتوئید خود و سنگ میزبان به ترتیب ۱۲۱٫۴ ppm و ۵۶۱٫۸ ppm است. از آنجا که در ترکیب سیال ماگمایی غلظت استرانسیم پایین است، استرانسیم موجود در پهنه‌های اسکارنی خود از سنگ آهکی میزبان تأمین شده است و در نتیجه دو پهنه اسکارنی گارنت اسکارن و گارنت پیروکسن اسکارن نسبت به سنگ آهک میزبان تهی‌شدگی نشان می‌دهند. غنی‌شدگی این جزء در پهنه مرمر کانه‌دار بیانگر نقش سیال ماگمایی در تامین این عنصر است. استرانسیم در پهنه‌های گارنت اسکارن و گارنت-پیروکسن اسکارن در ساختار گارنت‌های کلسیمی، پیروکسن-های کلسیمی، فرواکتینولیت، اپیدوت و کلسیت‌های بلورین جای دارد. این عنصر نیز در مرمرهای سولفیدی جانشین کلسیم در کلسیت‌های متبلور گردیده است.

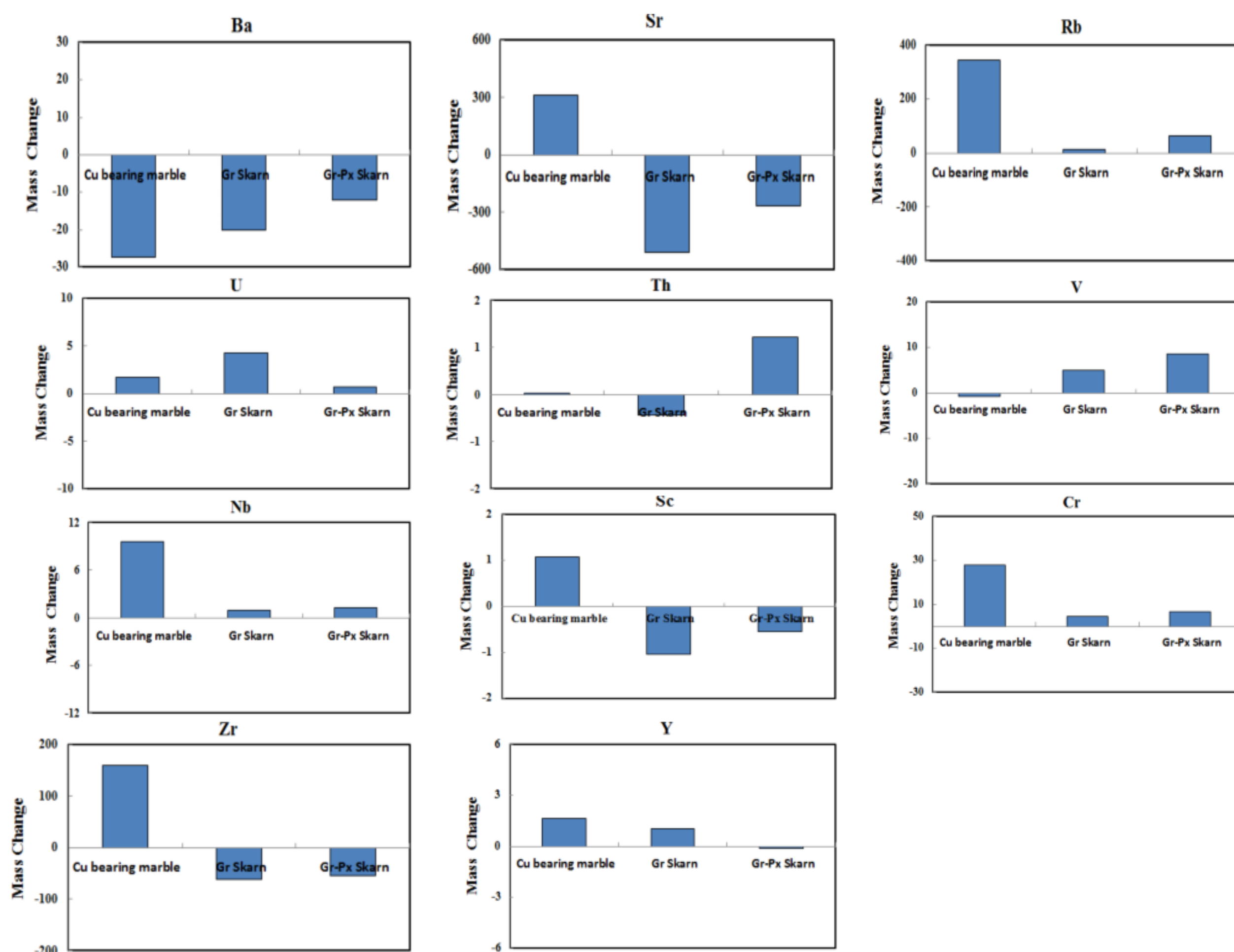
روبیدیم در پهنه‌های اسکارنی خود نسبت به سنگ میزبان آهکی غنی‌شدگی نشان می‌دهد (شکل ۶). این عنصر همراه با پتاسیم در شبکه کانی‌ها جای می‌گیرد. در پهنه های اسکارنی خود، روبیدیم در ساختار اپیدوت و گارنت‌های آلومینیم‌دار جای دارد.

اورانیم عنصری متحرک و بسیار نم‌ماگمادوست است و بنابراین در سیال ماگمایی می‌تواند به صورت محلول وجود داشته باشد. در همه پهنه‌های اسکارنی خود، غنی‌شدگی این عنصر نسبت به سنگ میزبان آهکی دیده می‌شود (شکل ۶) که می‌تواند به دلیل جانشینی Fe^{+3} با اورانیم در ساختار آندرادیت‌ها باشد. غنی‌شدگی این جزء در پهنه گارنت اسکارن بیشتر از پهنه گارنت- پیروکسن اسکارن است که به فراوانی

گارنت‌های تقریباً آندرادیتی نوع II در پهنه گارنت اسکارن و در نتیجه جانشینی بیشتر آهن با اورانیم اشاره دارد. نتایج تجزیه ICP-MS سایش لیزری (LA-ICP-MS) نیز وجود مقادیر بالای اورانیم در گارنت‌های نوع II نسبت به گارنت‌های نوع I را نشان داده است [۲].

توریم در پهنه گارنت-پیروکسن اسکارن غنی‌شدگی نشان می‌دهد، در حالی که در پهنه گارنت اسکارن تهی‌شدگی این عنصر رخ داده است (شکل ۶). تغییرات جرمی این عنصر به ترکیب گارنت در پهنه های اسکارنی مربوط است، به طوری که توریم در پهنه گارنت-پیروکسن اسکارن بدلیل داشتن گارنت-های آلومینیم‌دار (نوع I) غنی‌شدگی و در پهنه گارنت اسکارن به علت دارا بودن گارنت‌هایی با ترکیب آندرادیت (نوع II) تهی‌شدگی نشان داده است. از این رو، می‌توان گفت که توریم در ساختار گارنت‌های آلومینیم‌دار، جانشین آلومینیم شده است. نتایج تجزیه LA-ICP-MS نیز مقادیر توریم بیشتر را در ساختار گارنت‌های نسل I نسبت به گارنت‌های نسل II در پهنه گارنت- پیروکسن اسکارن نشان داده است [۲]. در پهنه مرمر کانه‌دار غنی‌شدگی بسیار ضعیفی دیده می‌شود که قابل چشم-پوشی است.

وانادیم در پهنه های اسکارنی جانشین آهن سه‌ظرفیتی در ساختار گارنت‌ها می‌شود و بنابراین این عنصر مانند آهن در پهنه های اسکارنی خود نسبت به سنگ آهکی میزبان غنی-شدگی نشان می‌دهد (شکل ۶). تهی‌شدگی وانادیم در پهنه مرمر کانه‌دار به دلیل نبود گارنت‌های آندرادیتی در این پهنه است، زیرا در کانی‌های اسکارنی خود، تنها آندرادیت دارای Fe^{+3} است و در نتیجه وانادیم تنها می‌تواند در ساختار این کانی جای گیرد.



شکل ۶ تغییرات جرمی عناصر نادر در پهنه‌های مختلف اسکارنی خود نسبت به سنگ کربناتی دگرسان نشده.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.1.2.3]
[DOI: 10.52547/ijcm.31.1.17]

نئوبیم در همه پهنه‌های اسکارنی خود غنی‌شدگی نسبت به سنگ آهکی میزبان نشان می‌دهد، به طوری که بالاترین میزان غنی‌شدگی در مرمرهای سولفیدی دیده می‌شود که می‌تواند به وجود کانی‌های سولفیدی فراوان در این پهنه نسبت داده شود (شکل ۶). به نظر می‌رسد که گارنت‌های آلومینیم‌دار در اسکارن خود (نوع I) نقش مهمی در غنی‌شدگی بیشتر این جزء دارند، زیرا چنان که نتایج تجزیه LA-ICP-MS نشان می‌دهد، غلظت Nb در گارنت‌های آلومینیم‌دار خود [۲] می‌تواند به دلیل جانشینی این عنصر همراه با تیتانیم به جای آلومینیم در جایگاه Y گارنت‌ها باشد.

اسکاندیم عنصر انتقالی و غیرمتحرک با شدت میدان بالاست. این عنصر جایگزین آهن دو ظرفیتی می‌شود [۱۳] و بنابراین طبیعی است که این عنصر در مرمرهای سولفیدی غنی‌شدگی و در سایر پهنه‌ها تهی‌شدگی نشان می‌دهد (شکل ۶). تهی‌شدگی این جزء به دلیل مقادیر کم کانی‌های فرومنیزین آهن‌دار در پهنه‌های اسکارنی بوده در حالی که غنی‌شدگی آن در پهنه مرمر کانه‌دار به علت فراوانی چشمگیر پیریت و کالکوپیریت و جانشینی آهن با اسکاندیم در این پهنه و تامین این عنصر از سیال ماگمایی است. تهی‌شدگی کمتر این عنصر در پهنه گارنت-پیروکسن اسکارن نسبت به پهنه گارنت اسکارن می‌تواند ناشی از وجود هدنبرژیت‌های غنی از منیزیم در پهنه گارنت- پیروکسن اسکارن باشد. اسکاندیم در پهنه گارنت-پیروکسن اسکارن می‌تواند جانشین آهن دو ظرفیتی در ساختار هدنبرژیت‌های غنی از منیزیم شود.

کروم عنصری سنگ دوست است و در ترکیب سنگ‌ها جانشین آهن سه ظرفیتی شده [۱۳] و بنابراین می‌تواند جانشین Fe^{+3} در ساختار گارنت‌های آندرادیتی گردد. غنی-شدگی این عنصر در پهنه های اسکارنی خود نشان می‌دهد که بخش عمده کروم موجود در پهنه‌های اسکارنی خود مانند آهن از سیال ماگمایی تامین شده است (شکل ۶).

گاسپار و همکاران [۱۳] باور دارند که جانشینی آلومینیم با زیرکونیم مانند تیتانیم در ساختار Y گارنت‌ها رخ می‌دهد. از آنجا که مقادیر زیرکونیم در شیل‌های رسوبی ۱۶۰ ppm و در کربنات‌ها ۱۹ ppm است، با توجه به مارنی بودن سنگ میزبان آهکی در اسکارن خود، زیرکونیم مورد نیاز در ساختار گارنت‌ها از بخش شیلی سنگ میزبان تامین گردیده است؛ از این رو، تهی‌شدگی این جزء در پهنه‌های گارنت-اسکارن و گارنت-پیروکسن اسکارن در منطقه خود طبیعی است (شکل ۶).

ایتریم در همه پهنه‌های اسکارنی خود غنی‌شدگی نسبت به سنگ میزبان آهکی نشان می‌دهد (شکل ۶). مقایسه تغییرات جرمی ایتریم با سایر عناصر اصلی در پهنه‌های اسکارنی خود نشان می‌دهد که تغییرات جرمی عنصر ایتریم با اکسید آهن تقریباً همخوانی دارد به طوری که با افزایش فاصله از پهنه گارنت-پیروکسن اسکارن به سمت مرمرهای سولفیدی غنی-شدگی عنصر ایتریم افزایش می‌یابد. این امر نشان‌دهنده افزایش جانشینی آهن با ایتریم در پهنه‌های اسکارنی خود است، به طوری که در پهنه مرمر کانه‌دار به دلیل داشتن بالاترین مقادیر آهن در ساختار سولفیدها، بیش‌ترین غنی-شدگی در این جزء دیده می‌شود.

رفتار زمین‌شیمیایی عناصر نادر آهن‌دوست و گوگرد دوست

نیکل در ترکیب مارنی سنگ آهکی میزبان خود جای دارد، زیرا شیل‌ها در سنگ‌های رسوبی دارای بالاترین غلظت نیکل (ppm ۶۸) در پوسته هستند. این عنصر در کانسار خود در پهنه‌های گارنت-پیروکسن اسکارن و مرمر کانه‌دار غنی‌شدگی نشان می‌دهد (شکل ۷). غنی‌شدگی این عنصر در پهنه گارنت-پیروکسن اسکارن را می‌توان به جانشینی منیزیم با نیکل در هدنبرژیت‌های غنی از منیزیم مربوط دانست. نتایج تجزیه به روش پراش پرتوی ایکس (XRD)، وجود کانی‌های منیزیم‌دار در پهنه مرمر کانه‌دار را ثابت کرده است [۲]. بر این اساس، تغییرات جرمی ناچیز این عنصر در پهنه گارنت اسکارن به علت مقادیر ناچیز کانی‌های منیزیم‌دار است. غنی‌شدگی چشمگیر این جزء در پهنه‌های اسکارنی خود نشان می‌دهد که افزون بر بخش مارنی سنگ آهکی، سیال ماگمایی تامین کننده اصلی نیکل در ساختار پهنه‌های اسکارنی بوده است.

در پهنه های اسکارنی خود به جز پهنه مرمر کانه‌دار، تغییرات جرمی چشمگیری در کبالت دیده نمی‌شود (شکل ۷). غنی‌شدگی قابل توجه این جزء در مرمرهای سولفیدی نسبت به سنگ آهکی میزبان می‌تواند به حضور فراوان کانی‌های سولفیدی و جانشینی آهن دو ظرفیتی با کبالت در ساختار آن نسبت داده شود.

مس، سرب و روی عناصر گوگرد دوست در پهنه‌های اسکارنی خود هستند. مس و روی تقریباً در پهنه‌های اسکارنی خود نسبت به سنگ میزبان آهکی غنی‌شدگی نشان می‌دهد (شکل ۷)، ولی غنی‌شدگی عنصر مس نسبت به روی بیشتر است که به دلیل فراوانی بیشتر آن در سیال ماگمایی برآمده از توده‌های نفوذی بارور است. عنصر سرب در همه پهنه‌های اسکارنی خود تهی‌شدگی نشان می‌دهد (شکل ۷).

بیشترین غنی‌شدگی مس در پهنه های اسکارنی خود مربوط به پهنه‌های مرمر کانه‌دار و گارنت- پیروکسن اسکارن است که می‌تواند به ترتیب به فراوانی کالکوپیریت در مرمرهای سولفیدی و جانشینی آهن با مس در ساختار هدنبرژیت‌های غنی از منیزیم در پهنه گارنت-پیروکسن اسکارن نسبت داده

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.1.2.3]
[DOI: 10.52547/ijcm.31.1.17]

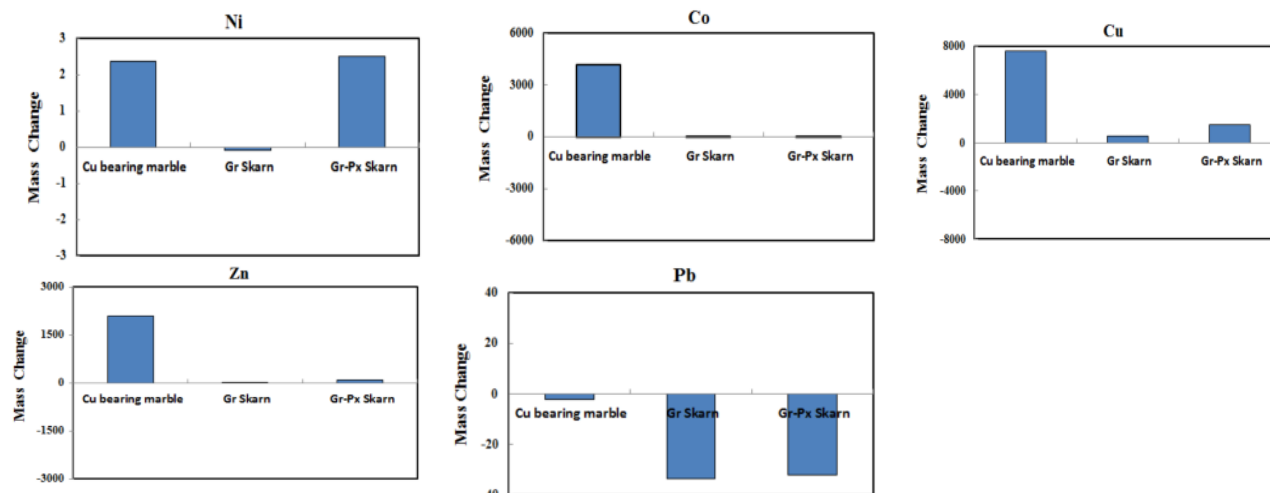
شوند (شکل۷). به باور گاسپار و همکاران [۱۳]، جانشینی کلسیم با مس و روی در ساختار گارنت‌های کلسیمی در جایگاه X گارنت‌ها امکان‌پذیر است، بنابراین به دلیل فراوانی کم پیروکسن و فراوانی گارنت‌های کلسیمی، غنی‌شدگی مس در پهنه گارنت-پیروکسن اسکارن نیز می‌تواند به جانشینی کلسیم با مس در ساختار گارنت‌ها نسبت داده شود. نتایج تجزیه LA-ICP-MS نیز نشان داد که مس اصلی‌ترین عنصر گوگرددوست در گارنت‌های کلسیمی خود است، به طوری که مقدار آن در گارنت‌های آندرادیتی نسل II به ppm ۱۷۲۷۶ می‌رسد [۲].

غنی‌شدگی روی در پهنه‌های اسکارنی تنها در پهنه مرمر کانه‌دار رخ داده است، در حالی که در سایر پهنه‌ها تغییرات جرمی ناچیزی دارد (شکل ۷). غنی‌شدگی این جزء در مرمر کانه‌دار به علت وجود اسفالریت بوده که نشان‌دهنده تامین این عنصر از سیال ماگمایی است.

سرب در همه پهنه‌های اسکارنی خود تهی‌شدگی نشان می‌دهد (شکل ۷). نتایج تجزیه LA-ICP-MS در گارنت‌های اسکارنی خود نشان می‌دهد که مقدار عنصر سرب در گارنت‌ها تقریباً صفر است [۲]، بنابراین تهی‌شدگی این جزء در پهنه -های اسکارنی خود به نبود سرب در ساختار کانیایی گارنت‌ها نسبت داده می‌شود. به باور گاسپار و همکاران [۱۳] نیز، عنصر سرب در ساختار کانیایی گارنت‌ها حضور ندارد که با نتایج تجزیه LA-ICP-MS از گارنت‌ها همخوانی دارد [۲]، در حالی که مقادیر روی در گارنت‌ها بالاتر از سرب بوده است.

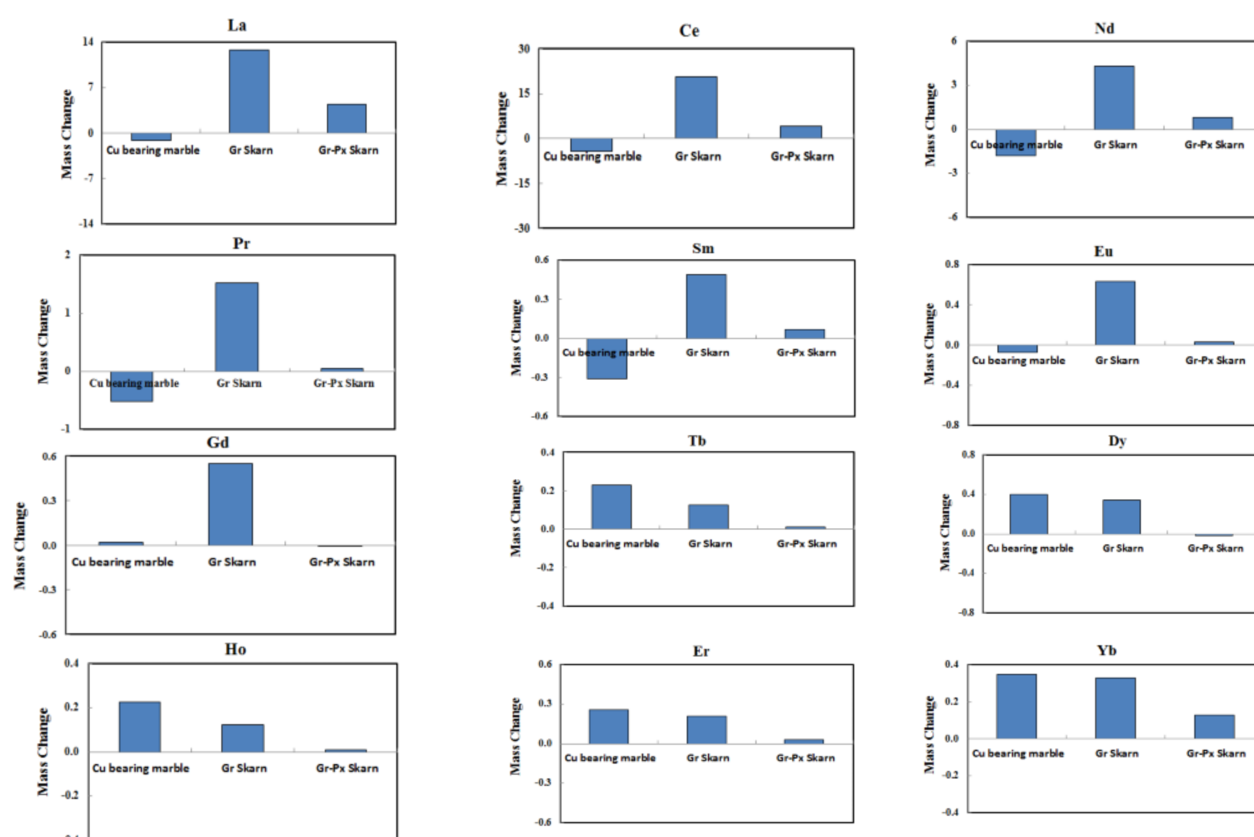
عناصر خاکی نادر: مقادیر میانگین عناصر خاکی نادر سبک و محاسبه تبادل های جرمی این عناصر در پهنه‌های گارنت اسکارن و گارنت-پیروکسن اسکارن در کانسار خود نشان می‌دهد که میزان غنی‌شدگی این عناصر با فراوانی گارنت‌ها و ترکیب آن ارتباط مستقیم دارد، به طوری که با افزایش مقدار گارنت‌های آلومینیم‌دار، مقادیر عناصر خاکی نادر سبک نسبت به سایر پهنه‌های اسکارنی افزایش می‌یابد. به باور گاسپار و همکاران [۱۳]، جانشینی کلسیم با عناصر خاکی نادر سبک به دلیل داشتن شعاع یونی مشابه امکان‌پذیر است، بنابراین افزایش گارنت‌های کلسیمی در اسکارن کلسیمی خود منجر به جانشینی بیشتر کلسیم با عناصر خاکی نادر سبک و در نتیجه افزایش مقدار عناصر خاکی نادر سبک در این پهنه شده است. از آنجا که در گارنت‌های آلومینیم‌دار، مقادیر کلسیم بیشتری نسبت به گارنت‌های آندرادیتی وجود دارد، میزان غنی‌شدگی عناصر خاکی نادر در گارنت‌های اسکارنی خود بیشتر است.

در پهنه‌های اسکارنی خود نمودارهای غنی‌شدگی-تهی‌شدگی لانتانیم و سریم شبیه بوده است، به طوری که در پهنه‌های گارنت-پیروکسن اسکارن و گارنت اسکارن نسبت به سنگ آهک میزبان غنی‌شدگی و در مرمرهای سولفیدی تهی‌شدگی آنها دیده می‌شود (شکل ۸). غنی‌شدگی این دو عنصر نیز به وجود گارنت‌های آلومینیم‌دار در این پهنه نسبت داده می‌شود. غنی‌شدگی این دو جزء بستگی به ترکیب گارنت‌ها دارد [۱۳]، زیرا در گارنت‌های آلومینیم‌دار در اسکارن خود جانشینی بیشتری توسط عناصر خاکی نادر رخ می‌دهد. غنی‌شدگی بیشتر عنصر سریم نسبت به لانتانیم در پهنه‌های اسکارنی خود به فراوانی بیشتر سریم در شیل‌ها مربوط است، به طوری که مقادیر سریم و لانتانیم در شیل‌ها به ترتیب برابر با ۵۰ و ppm ۱۰ است. از این رو، غنی‌شدگی بیشتر این دو عنصر می‌تواند به وجود سنگ آهک مارنی میزبان در منطقه خود نیز نسبت داده شود، زیرا بخش شیلی سازند کربناتی نایبند در تشکیل پهنه-های اسکارنی خود نیز اثر داشته است



شکل ۷ تغییرات جرمی عناصر نادر گوگرد دوست و آهن دوست در پهنه های مختلف اسکارنی خود نسبت به سنگ کربناتی دگرسان نشده.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.1.2.3]
[DOI: 10.52547/ijcm.31.1.17]



شکل ۸ تغییرات جرمی عناصر نادر گوگرد دوست و آهن دوست در پهنه‌های مختلف اسکارنی خود نسبت به سنگ کربناتی دگرسان نشده.

نئودیمیم در پهنه‌های اسکارنی گارنت اسکارن و گارنت-پیروکسن اسکارن در منطقه خود غنی‌شدگی نشان می‌دهد (شکل ۸) که می‌تواند به علت جایگزینی آهن سه ظرفیتی با نئودیمیم در ساختار گارنت‌ها باشد. براساس نتایج تجزیه LA-ICP-MS برای ساختار گارنت‌های کلسیمی خود، مقادیر نئودیمیم در ساختار گارنت‌های اسکارنی خود بالاست [۳] که به ترکیب سنگ میزبان کربناتی بستگی دارد، زیرا بخش شیلی سنگ کربناتی در منطقه خود می‌تواند دارای مقادیر مناسبی از نئودیمیم باشد.

از میان عناصر خاکی نادر سبک، پرازئودیمیم کمترین مقدار را در پهنه‌های اسکارنی خود دارد که به فراوانی پایین آن در سنگ میزبان و پوسته اشاره دارد. غنی‌شدگی بیشتر این عنصر در پهنه گارنت اسکارن به حضور فراوان گارنت‌ها و جاگیری این عنصر در ساختار گارنت‌ها نسبت داده می‌شود (شکل ۸).

ساماریم و یوروپیم نسبت به سنگ میزبان آهکی در پهنه-های گارنت-پیروکسن اسکارن و گارنت اسکارن غنی‌شدگی نشان می‌دهند، در حالی که در مرمر کانه‌دار تهی‌شدگی این اجزا دیده می‌شود (شکل ۸). غنی‌شدگی این عناصر نشان-دهنده محلول بودن آنها در سیال ماگمایی است. از این رو ساماریم و یوروپیم موجود در پهنه‌های گارنت اسکارن و گارنت-پیروکسن اسکارن از سیال ماگمایی تامین گردیده‌اند، در حالی که تهی‌شدگی آنها در مرمر کانه‌دار نشان‌دهنده پایین بودن مقادیر این عناصر در مرمرهای سولفیدی و در نتیجه تشکیل نشدن کانی‌های دربردارنده این عناصر است.

از آنجا که با افزایش گارنت‌های کلسیمی جانشینی این عناصر در ساختار گارنت‌ها افزایش می‌یابد، می‌توان گفت که تهی‌شدگی این عناصر در مرمر کانه‌دار به دلیل نبود گارنت‌ها در این پهنه است. تهی‌شدگی کمتر یوروپیم نسبت به ساماریم در مرمرهای سولفیدی به دلیل جانشینی یوروپیم به جای کلسیم در ساختار کلسیت‌های بلورین است.

گادولینیم: غنی‌شدگی شدیدی نسبت به سنگ آهکی میزبان در پهنه گارنت اسکارن نشان می‌دهد، در حالی که غنی‌شدگی این جزء در پهنه مرمر کانه‌دار بسیار ضعیف است (شکل ۸). از آنجا که در پهنه گارنت اسکارن، گارنت‌های کلسیمی کانی غالب هستند و در پهنه مرمر کانه‌دار کانی گارنت حضور ندارد، بنابراین چنین نتیجه می‌شود که غنی‌شدگی و تهی‌شدگی این جزء به ترتیب به وجود و نبود کانی گارنت وابسته است.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.1.2.3]
[DOI: 10.52547/ijcm.31.1.17]

نمودار تبادل‌های جرمی تربیم، دیسپروزیم و هولمیم

در پهنه‌های اسکارنی خود یکسان بوده که نشان‌دهنده رفتار زمین‌شیمیایی مشابه این عناصر با هم است (شکل ۸). غنی-شدگی این عناصر در پهنه‌های اسکارنی نسبت به سنگ آهک میزبان نشان می‌دهد که آنها توسط سیال ماگمایی تامین گردیده‌اند.

اربیم و ایتربیم در همه پهنه‌های اسکارنی خود غنی‌شدگی نشان می‌دهند که بیانگر محلول بودن آن‌ها در سیال ماگمایی است، از این رو، سیال ماگمایی نقش مهمی در تامین این عناصر داشته است (شکل ۸).

برداشت

کانسار مس خود از نوع اسکارن‌های دگرنهاده نوع تراوشی محسوب می‌شود [۲] که با غنی‌شدگی و تهی‌شدگی عناصر توسط تراوش سیال همراه بوده است. محاسبه تبادل‌های جرمی عناصر نشان می‌دهد که ورود مقادیر قابل ملاحظه‌ای از عناصر اصلی چون آهن و سیلسیم از سیال ماگمایی منجر به تشکیل مقادیر قابل ملاحظه‌ای از آندرادیت‌های غنی از آهن در مرحله پیش‌رونده گردیده است. ترکیب شیمیایی گارنت‌ها نشان می‌دهد که غنی‌شدگی عناصر اوارنیم، وانادیم، کروم و ایتریم با جانشینی آهن در این مرحله رخ داده است. غنی‌شدگی عناصر گوگرد دوست در مرحله پس‌رونده می‌تواند به کانی‌های سولفیدی چون کالکوپیریت اسفالریت نسبت داده شود. غنی‌شدگی عناصر خاکی نادر سبک به ترکیب گارنت‌ها و جانشینی عناصر آهن و آلومینیم در ساختار گارنت‌ها نسبت داده می‌شود.

قدردانی

مولفین صمیمانه از همکاری‌های بی‌دریغ پرفسور ناکاشیما از بخش علوم زمین دانشگاه یاماگاتا در ژاپن برای انجام تجزیه-های شیمیایی XRF و نیز از پروفسور دیوید لنز برای انجام تجزیه‌های ICP-Mass Spectrometry تشکر و قدردانی می-نمایند.

مراجع

[1] Yazdi M., *"The study of economic geology and lithology in Khut ore deposit (MSc thesis)"*, Shahid Beheshti University, Tehran, (1992) 207p.

[2] Zahedi A., *"Geochemistry of Cu-Fe skarn occurrences and related intrusive rocks from the Khut and Panah-Kuh area, west of Yazd, Central Iran"*, (PhD thesis). University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, (2014) 430p (in Persian)

[3] MacLean W. H., *"Mass change calculations in altered rocks series"*, mineralium deposita, 25 (1990) 44-49.

[4] Zahedi A., Boomeri M., *"Geochemical characteristics, origin, and evolution of ore-forming fluids of the Khut copper skarn deposit, west of Yazd in Central Iran"*, Resource Geology, 64 (2014) 209-232.

[5] Meinert L.D., *"Application of skarn deposit zonation models to mineral exploration", Exploration and* Mining Geology, 6 (1997) 185-208.

[6] Gresens R. L., *"Composition-volume relationships of metasomatism",* Chemical Geology, 2 (1967) 47-55.

[7] Grant J.A., *"The isocon diagram, a simple solution to Gresen's equation for metasomatic alteration",* Economic Geology, 81 (1986) 1976-1982.

[8] Nesbitt H.W., Markovics G., Price R.C., *"Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths continental weathering"*, Geochemica et Cosmochimica Acta, 44 (1980) 1659-1666.

[9] MacLean W.H., Kranidiotis P., *"Immobile elements as monitors of mass transfer in hydrothermal alteration: Phelps Dodge massive sulfide deposite, Matagami. Qubec", Economic Geology*, 82 (1987) 951-962.

[10] Griffin W.L., Smith D., Ryan C.G., O'Reilly S.Y., Win T.T., *"Trace-element zoning in mantle minerals: Metasomatism and thermal events in the upper mantle"*, Canadian Mineralogist, 34 (1996) 1179-1193.

[11] Jenner G.A ., *"Trace element geochemistry of igneous rocks: Geochemical nomenclature and analytical geochemistry, in Wyman",* D.A ed., *"Trace element geochemistry of volcanic rocks: Applications for massive sulphide exploration"* Geological Association of Canada, Short Course Notes, 12 (1996) 51-77.

[12] Mason B., Moore C.B., *"Principle of geochemistry"* Wiley, NewYork, 344p, 1982.

[13] Gaspar M., Knaack C., Meinert L.D., Moretti R., *"REE in skarn system: A LA-ICP-MS study of garnet from the Crown Jewel gold deposit"* Geochemica et Cosmochimica Acta, 72 (2008) 185-205.